第46卷 第4期
2023年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 4
Apr. 2023

六盘山区两类雾物理结构的初步观测研究

党张利[1,2]， 穆建华[1,2]， 闫 军[1]， 曹 宁[1,2]， 常倬林[1,2]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750002；
2. 宁夏回族自治区人工影响天气中心，宁夏 银川 750002）

摘 要： 利用2020年在六盘山区观测高山雾获得的隆德、泾源、六盘山气象站地面能见度、温度、相对湿度、风等常规观测资料和微波辐射计温度、相对湿度垂直观测资料，初步分析了六盘山区大范围和仅山顶出现雾时的环流形势和温湿垂直演变特征。结果表明：六盘山区大范围雾过程和仅山顶雾过程都是受槽前暖湿气流影响，降温增湿导致的，两类雾过程地面相对湿度大于95%，以偏南风为主，隆德和泾源气象站能见度多在200 m以上，六盘山气象站一半以上时间能见度低于200 m。六盘山气象站的雾生消迅速，强浓雾持续时间较长，逆温层厚度增厚早于强浓雾出现的时间，垂直发展深厚，雾发展成熟时逆温层厚度达到1130 m，隆德气象站随着雾发展逆温层厚度也有增厚，但远远小于六盘山气象站，而六盘山气象站逆温强度弱于隆德气象站。随着雾的发展，相对湿度存在明显的向上延伸现象，90%以上相对湿度延伸到1040 m，同时六盘山气象站在出现强浓雾时隆德气象站微波辐射计能够观测到600 m左右的饱和区，这对分析六盘山区典型高山雾垂直演变具有重要意义。

关 键 词： 雾；物理结构；观测研究；六盘山区

文章编号： 1000－6060(2023)04－0574－09(0574～0582)

雾是近地层空气中悬浮着大量水滴或冰晶微粒而使水平能见度降到1 km以下的天气现象，雾对人类直接和间接的影响引起多学科关注，许多学者对雾进行多方面研究[1-4]，对华北[5-7]、西北[8-10]、南京[11-12]、湛江[13-14]等不同下垫面雾的环流背景和边界层特征进行研究，发现雾发生时低层有暖平流输入、水汽辐合，同时伴随逆温层和相对湿度增大现象。目前，雾还不能准确预报，主要原因是对雾的物理过程认识还不够，因此雾的观测研究十分重要。

高山雾是发生在1~2 km高山上，主要是高空云层（包括气流沿坡被迫抬升形成）移动经过产生的。国内外对高山雾的研究起步较早，一些欧洲中部的高山站运行已超过100 a[15]，20世纪30年代，我国在湖南衡山建设了最早的高山站，高山雾与局地地形、辐射逆温等因素有关，不同地区雾的时空分布不同，郭丽君等[16]发现庐山云雾多发生在秋冬春季；费冬冬等[17]发现湖北山地雾发生时风速较小，风向多为东南风，近地层出现逆温，云接地，雾消散时低空相对湿度仍然保持较大值，云底高度上升；邓雪娇等[18]对南岭山地雾发生时近地面气象要素分析，发现雾发生时伴随逆温形成、相对湿度增大等特点，低层湿度饱和区向地面扩展，云底接地，单层强逆温结构有利于雾的发展和维持，多层弱逆温结构容易导致雾消散；尤红等[19]对云南昆洛高速公路峨山段典型山地雾过程进行分析，发现雾区上空850~800 hPa层处存在逆温层或中性层，逆温层越强，山地雾越浓。

六盘山区位于宁夏南部，位于青藏高原东北缘，是我国黄土高原西部具有代表性的温带山地森

收稿日期： 2022-08-03； **修订日期：** 2022-08-29

基金项目： 宁夏回族自治区重点研发计划(2022BEG02010)；国家自然科学基金项目(42075073)；宁夏自然科学基金项目(2021AAC03489)；中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室项目(CAMP-202106)资助

作者简介： 党张利(1988-)，女，工程师，主要从事人工影响天气等方面的研究. E-mail: 1336833529@qq.com

通讯作者： 穆建华(1981-)，男，高级工程师，主要从事人工影响天气等方面的研究. E-mail: musa328@163.com

林生态系统和重要的水源涵养地。六盘山区具有较强的水汽输送，受亚洲季风影响，夏季偏南风向六盘山区输送丰沛的水汽，山区是相对湿度高值区[20]。受地形影响，在距离20 km范围内出现雾日数存在明显差异，2020年宁夏气象灾害防御技术中心在六盘山大气科学野外试验基地开展了六盘山区云雾观测试验。本研究选取了该观测试验中持续时间最长、强度最强的两类雾过程作为研究对象，探讨不同气象要素对雾过程的影响，初步分析两类雾过程发生时的物理结构差异，为提高六盘山区云雾监测预警、数值模拟、人工消雾、旅游资源开发具有重要的意义。

1　研究区概况

六盘山区地处西北地区东部，地理位置介于34.9°~36.2°N，105.6°~106.7°E之间，山脊海拔超过2500 m，最高峰米缸山海拔为2942 m，东坡陡峭而西坡和缓，六盘山气象站（地理位置：106.2°E，35.7°N，海拔高度：2845.2 m）位于六盘山区海拔最高的气象观测站，年平均雾日数高达153.4 d。泾源气象站（地理位置：106.3°E，35.5°N，海拔高度：1984.2 m）位于六盘山东南侧山脚，距离六盘山气象站21 km，泾源县四周环山，年平均雾日数接近40 d；隆德气象站（地理位置：106.1°E，35.6°N，海拔高度：2151 m）位于六盘山西侧山脚，距离六盘山气象站不到10 km，隆德县十山九沟，年平均雾日数在10 d内。图1星号标记仪器所在的位置。

2　资料与方法

文中使用2020年六盘山区云雾观测试验期间典型雾过程的气象站地面观测资料、隆德气象站微波辐射计资料和ERA5再分析资料对六盘山区两类雾过程环流背景、宏观物理结构和温度、相对湿度垂直结构演变特征进行初步分析。其中，雾的宏观

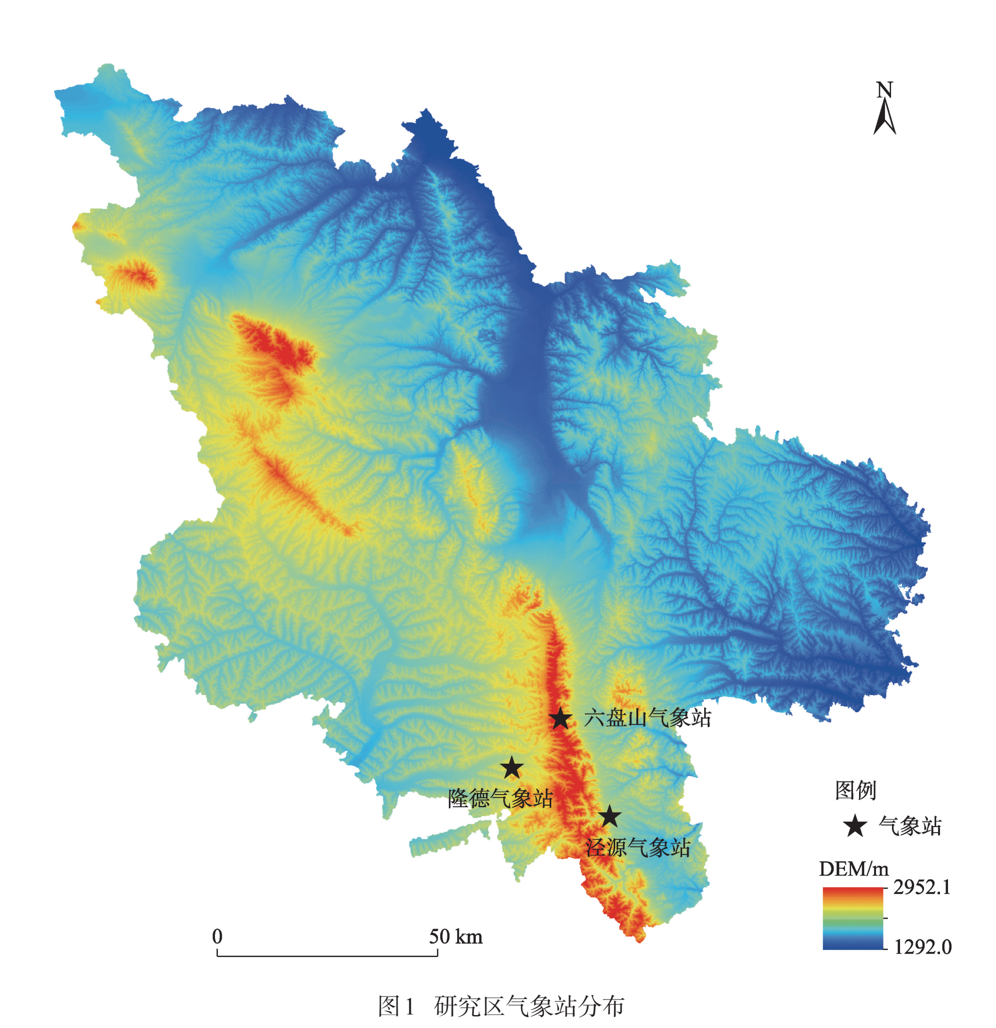


图1　研究区气象站分布

Fig. 1　Distribution of meteorological stations in the study area

物理结构观测使用的是国家气象观测站温度、气压、相对湿度和能见度观测设备；雾的垂直结构观测使用德国METEK公司生产的42通道RPG-HAT-PRO-G4型微波辐射计，能够获取93层垂直廓线，其中0~100 m的垂直分辨率为25 m，100~500 m的垂直分辨率为30 m，500~1200 m的垂直分辨率为40 m，1200 m以上垂直分辨率从60 m到300 m不等，时间分辨率为1 min，观测期间安装在隆德国家气象观测站，在观测期间每个季度对微波辐射计进行液氮定标；雾的环流背景使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的ERA5再分析资料提供全球格点数据的物理量场(位势高度场、湿度场、温度场、水汽通量场、水汽通量散度场、风场)。

3 结果与分析

3.1 大范围雾过程

3.1.1 大范围雾过程概述 利用六盘山气象站、泾源气象站、隆德气象站中能见度资料，给出3个气象站能见度时间序列图(图2)，在分析雾天气过程中对持续的雾天气过程中出现短暂减弱没有分开处理，六盘山气象站雾开始于2月26日19:09，结束于27日20:41，最小能见度为29 m，出现在2月27日09:14，浓雾持续了506 min，强浓雾持续了403 min；隆德气象站雾开始于2月27日22:17，结束于2月27日23:43，最小能见度为188 m，出现在2月27日22:30，浓雾持续了2 min；泾源气象站雾开始于2月27日00:17，结束于2月27日03:51，最小能见度为423 m，出现在2月27日01:07，未出现浓雾阶段。分析能见度在六盘山区的时间变化，发现山顶(六盘山气象站)雾持续时间最长；东坡(泾源气象站)随着山顶云底高度降低出现3 h左右的雾过程，系统性的天气过程自东向西移动；西坡(隆德气象站)出现快速的雾过程，虽然西坡雾过程持续时间最短，但西坡最小能见度低于东坡，说明系统性天气过程在移动过程中加速，但强度增强。

3.1.2 大范围雾环流形势分析 天气系统是雾发生、发展、消散的主要因素，分析大范围雾过程的天气形势：从位势高度、温度场、湿度场和风场图上看，500 hPa欧亚地区处于两槽一脊环流背景下，南支槽南伸到孟加拉湾附近，六盘山区位于槽前西南气流，有明显的暖平流，图3a显示六盘山区在700 hPa位于低涡前部西南气流和切变线影响区，且六盘山区存在明显的风速辐合，风速从云南地区为18 m·s^{-1}，到六盘山附近为4 m·s^{-1}，从700 hPa到500 hPa六盘山区均受西南气流影响，相对湿度大于90%，六盘山区位于地面冷高压前部的均压场中。此次六盘山区大范围雾过程是由于高空贝加尔湖附近低压和南支槽、中层东移短波槽、地面均压场共同影响发生的一次系统性云雾降水天气过程。

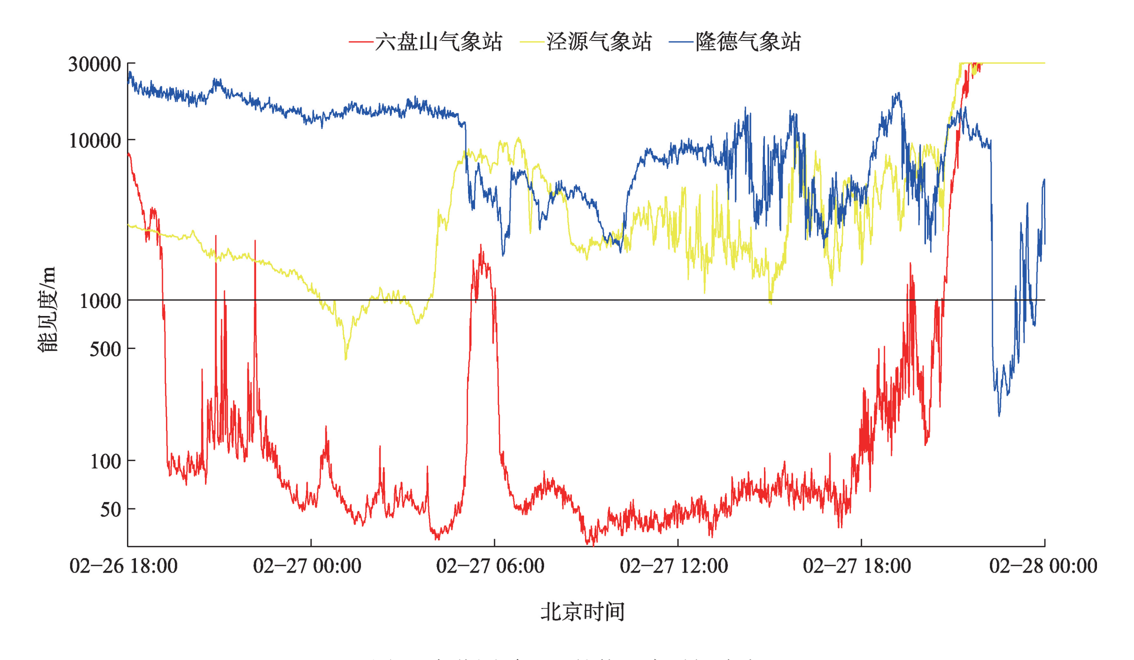


图2 大范围雾过程的能见度时间演变

Fig. 2 Temporal evolution of visibility during a largescale fog process

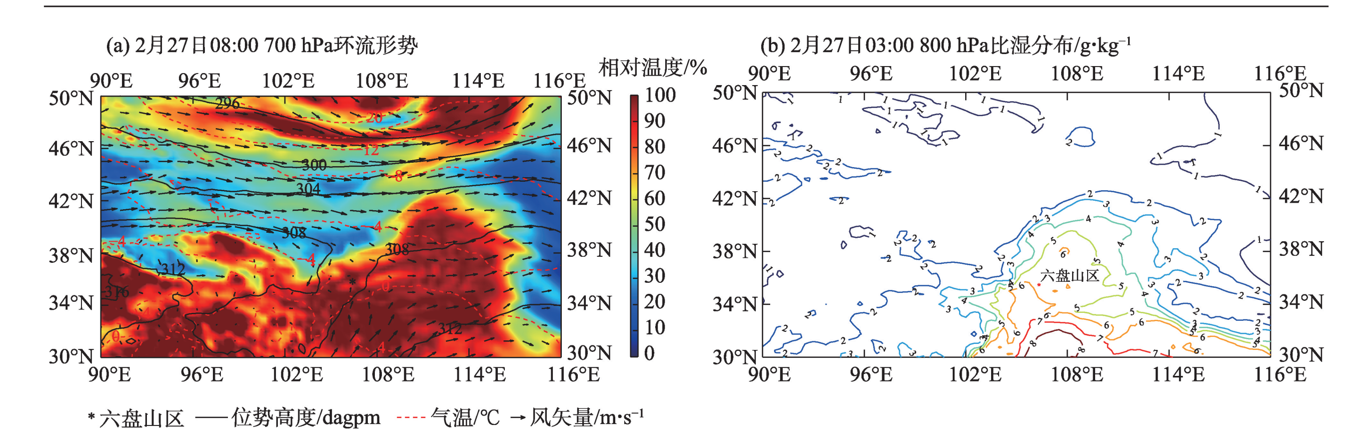


图3　大范围雾过程的天气形势

Fig. 3　Weather situation of a largescale fog process

雾的形成和维持要满足一定的水汽条件，六盘山雾开始前26日18:00近地面(700 hPa)比湿已达到4 g·kg^{-1}，六盘山26日19:00雾开始形成；泾源雾开始前27日03:00(图3b)近地层(800 hPa)比湿大于5 g·kg^{-1}，隆德雾开始前27日22:00近地层(800 hPa)比湿为3 g·kg^{-1}。26日18:00水汽通量大值区位于宁夏南部，在偏南气流引导下，水汽通量大值区经过宁夏向陕西西部移动，六盘山区水汽通量在27日后半夜达到最大，值为3 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}，随着风向转北，水汽通量降低1 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}，比湿小于3 g·kg^{-1}。

3.1.3　大范围雾过程地面气象要素变化　地面气象要素直观反映雾发生前后气象要素变化，六盘山气象站气温从雾前0.3 ℃持续降低到−5.8 ℃，相对湿度从雾前的92%增加到浓雾的98%，之后减弱到93%，雾前风速维持在2.7~5.8 m·s^{-1}，随着六盘山气象站雾的发展，浓雾阶段风速达到最大10.3 m·s^{-1}，雾消散风速减弱到1.7 m·s^{-1}，雾前到发展阶段，六盘山气象站吹西南风，浓雾阶段风向从西南转东南再转东北风，雾减弱到消散阶段六盘山吹东北风；隆德气象站雾期间气温从雾前7.7 ℃持续下降到−2.0 ℃，雾发展到消散气温相对较平稳，维持在−1.8~−2.0 ℃，相对湿度从雾前的66%增加到浓雾的97%，之后一直维持在97%直至雾消散，雾前隆德气象站风速变化较大，从静风到4.1 m·s^{-1}，雾从发展到消散风速低于3 m·s^{-1}，且持续下降，风向以偏南风为主；泾源气象站雾期间气温从4.3 ℃下降到1.6 ℃，雾发展阶段气温维持在1.6 ℃上下，减弱和消散阶段气温均有下降，最终气温下降到−1.6 ℃，相对湿度从雾前的78%增加到发展最旺盛时的95%，雾消散时最小相对湿度为86%，浓雾阶段风速最小，平均风速为0.8 m·s^{-1}，风向以偏南风为主。综合分析3个地面气象站的观测资料，雾发生过程中六盘山、隆德、泾源气象站气温均下降，相对湿度增至95%以上，东西坡2站风速较小，风速以偏南风为主，水汽通量增加，比湿增加，雾发生，受系统性天气过程影响雾发生时间短而快，而山顶虽然也是受系统性天气过程影响，但由于海拔在2800 m以上，山顶处于云中直至大范围云系移走能见度才转好。

3.1.4　大范围雾过程温度、相对湿度垂直分布　利用隆德气象站微波辐射计资料，分析不同区域相对湿度(图4a)、温度(图4b)垂直分布特征。27日05:00至27日20:00受降水影响，相对湿度垂直变化不明显，根据隆德气象站小时降水资料显示，隆德气象站在27日05:00开始出现小于1 mm·h^{-1}的小时降水量，持续到27日20:00，隆德气象站未出现雾时相对湿度随高度迅速减小(除降水出现时间段)，降水结束后2 h隆德气象站开始出现雾，随着雾发展，大于90%相对湿度向上空延伸到400 m(相对高度)，随着雾消散，相对湿度朝地面减弱，在降水之前相对湿度出现几个时段的从地面到1800 m(相对高度)上空相对湿度较高区域。这可能与六盘山气象站雾有关，通过与六盘山气象站能见度趋势对比发现，当出现1800 m范围内相对湿度高值区域时六盘山气象站能见度出现迅速的减低，低层相对湿度变化对其上空能见度变化影响剧烈。为了对隆德气象站上空逆温层进行分析，将出现逆温和等温高度的温度在图中显示出来，其他高度的温度没有显示，

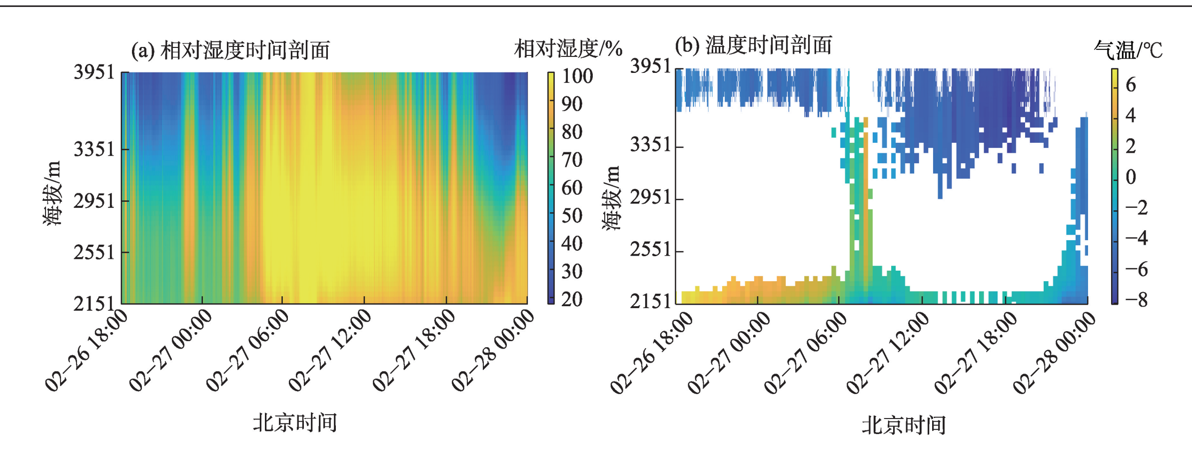


图4 大范围雾过程的温湿时间垂直变化

Fig. 4 Time evolution of temperature and humidity of a largescale fog process at different heights

整体隆德气象站上空温度随高度递减，随时间降低，最大温度出现在2月26日18:00，27日14:00之前近地面温度高于0 ℃，14:00之后温度降到0 ℃以下，从26日18:00隆德气象站近地面开始出现逆温，逆温层厚度随时间增加，27日08:00逆温层厚度达到最厚，早于六盘山气象站出现最低能见度时间1 h左右，此时逆温强度持续了17 min，厚度为1409 m，增温了5.4 ℃，受降水影响逆温逐渐消失，降水结束后27日20:00逆温层又开始出现，27日22:45出现220 m的逆温层，在六盘山气象站近地层持续出现逆温或等温层，强浓雾出现的时间和逆温或等温层增厚一致，随着雾消散，逆温或等温层也消散。综合不同区域雾的发生时段，对2月26日18:00、20:00、23:00和27日01:00、23:00的温度垂直廓线进行分析，发现这5个时间段均出现不同强度的逆温，逆温强度最强发生在27日23:00，100 m增温1.7 ℃，逆温层厚度为190 m，其他逆温层厚度均在100 m范围内，受夜间辐射降温、雾前弱降水影响隆德气象站出现不到2 h的雾天气；六盘山气象站降水前的雾主要发生在26日18:00至27日05:00之前，该时段隆德气象站近地层出现逆温，六盘山气象站上空也出现逆温，此阶段雾主要是夜间辐射降温引起的，27日05:00之后出现与降水时间段相吻合的雾天，该时段近地面层出现逆温或等温，随着雾和降水的结束逆温或等温层消失；泾源气象站雾出现在后半夜，与常规辐射雾出现的时间段吻合，典型的辐射雾。

3.2 典型山顶雾过程

3.2.1 山顶雾过程概述 基于六盘山、泾源、隆德气象站能见度的时序变化图(图5)，对比分析山顶和山两侧能见度的差异，图中显示，隆德气象站能见度变化平稳，泾源气象站在7日20:00到8日08:00能见度完全转好，六盘山气象站雾开始于3月7日23:45，结束于3月8日08:15，持续了511 min，最小能见度为36 m，出现在8日02:06，浓雾持续了189 min，强浓雾持续了303 min。分析六盘山气象站能见度时序变化时，发现六盘山气象站7日23:45能见度为611 m，23:46能见度就降到172 m，浓雾到雾消散仅用了22 min，浓雾迅速演变成强浓雾，强浓雾程序时间占总雾时间一半以上。

3.2.2 山顶雾过程环流形势 3月8日00:00的500 hPa气流平滑，六盘山区位于西偏南气流中，08:00六盘山区受短波槽前弱暖平流影响，图6a显示00:00的700 hPa六盘山区位于低压前部南风气流中，存在明显的暖平流，08:00处于甘肃省中部冷空气和西南暖湿气流交汇处，相对湿度大于90%，00:00地面处于冷高压前端1005 hPa均压场中，随着冷高压往东南方向移动六盘山区气压为1010 hPa，雾开始前3月7日22:00近地面比湿为3 $g\cdot kg^{-1}$，受偏南气流影响，相对湿度不断增加，比湿达到3~4 $g\cdot kg^{-1}$之间(图6b)，在雾发生发展过程中水汽通量达到3 $g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$。

3.2.3 山顶雾过程地面气象要素变化 雾前气温从−0.5 ℃降低到−3.2 ℃，雾从发展到减弱阶段气温维持在−3.3~−2.1 ℃，随着雾的消散气温回升，消散时最大气温为−0.8 ℃，相对湿度从雾前的81%增加到雾消散前的96%，消散阶段最小相对湿度为39%。其中，雾在发展到减弱阶段相对湿度基本维持在96%，雾前到浓雾阶段风速较大，平均值均大于6.0 $m\cdot s^{-1}$，浓雾期间风速最大，最大风速为15.8 $m\cdot s^{-1}$，雾减

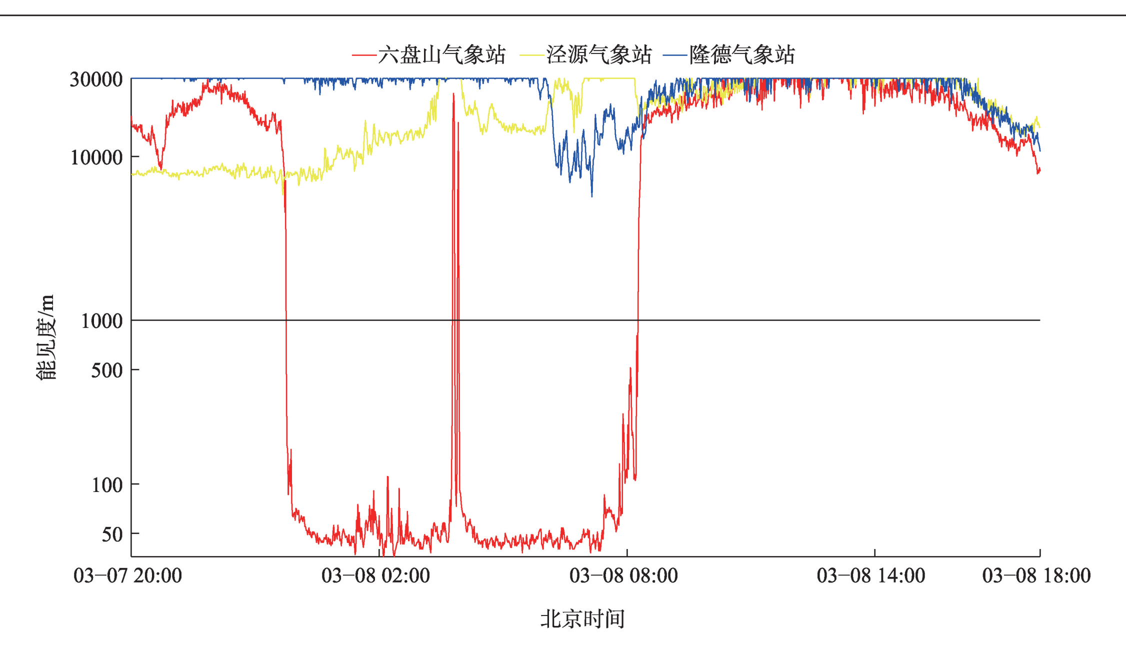


图5 山顶雾过程的能见度时间演变

Fig. 5 Temporal evolution of visibility during a mountain top fog process

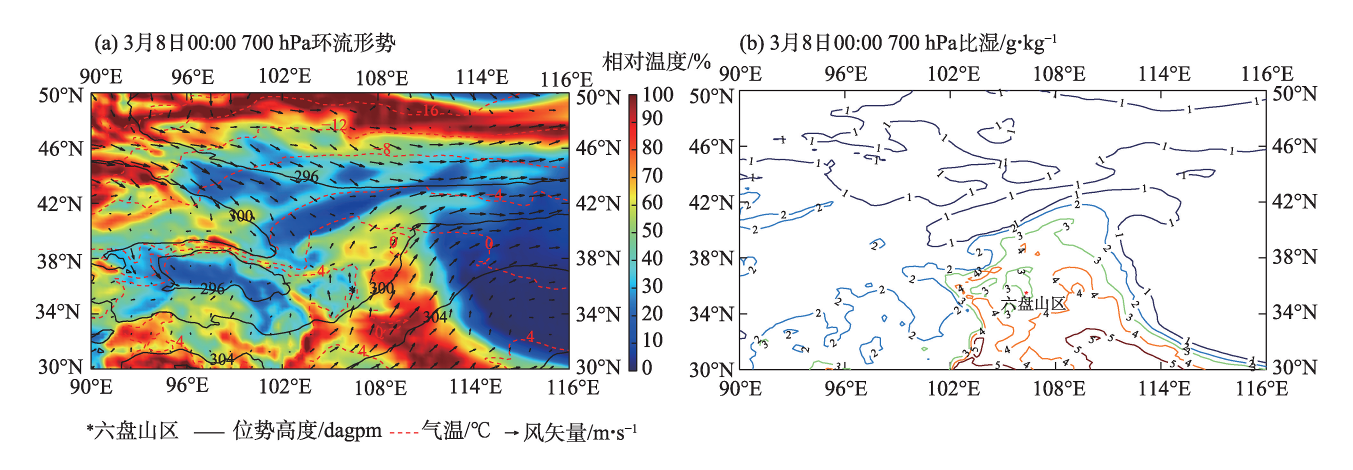


图6 山顶雾过程的天气形势

Fig. 6 Weather situation of a mountain top fog process

弱阶段但风速最小，平均值为3.7 m·s^{-1}，维持在2.8 m·s^{-1}以下，从雾前到浓雾阶段以西南风为主，雾减弱到消散阶段风向从西北风转为东北风；六盘山气象站雾时间段内泾源气象站最低气温为−1.0 ℃，最高气温为5.8 ℃，最大相对湿度为88%，最小相对湿度仅为18%，平均风速为3.7 m·s^{-1}，风向以西北风为主；六盘山气象站雾时间段内隆德气象站最低气温为2.2 ℃，最高气温为6.6 ℃，最小相对湿度为17%，最大相对湿度为89%，平均风速为2.9 m·s^{-1}，风向从西北风转为东南风。

3.2.4 山顶雾过程温度、相对湿度垂直分布 利用隆德气象站微波辐射计资料，分析六盘山区上空温湿垂直分布（图7a~b），为了直观显示六盘山区上空逆温层分布，温度垂直廓线只显示了出现逆温或者等温高度处的温度。相对湿度随时间先增加后减小，8日06:30左右相对湿度达到峰值，且8日05:42—06:53在2281~2872 m（海拔高度）高度处出现饱和区（相对湿度≥99%），这与六盘山气象站出现持续强浓雾时间吻合，大于90%相对湿度延伸到3191 m，这与费冬冬等[17]研究的湖北宣恩山地雾成熟阶段发展深厚结论一致，但六盘山气象站垂直发展更深厚，最大厚度达到1040 m，08:15能见度大于1000 m时相对湿度仍然大于90%，09:11相对湿度开始低于90%。温度垂直分布显示隆德气象站近地

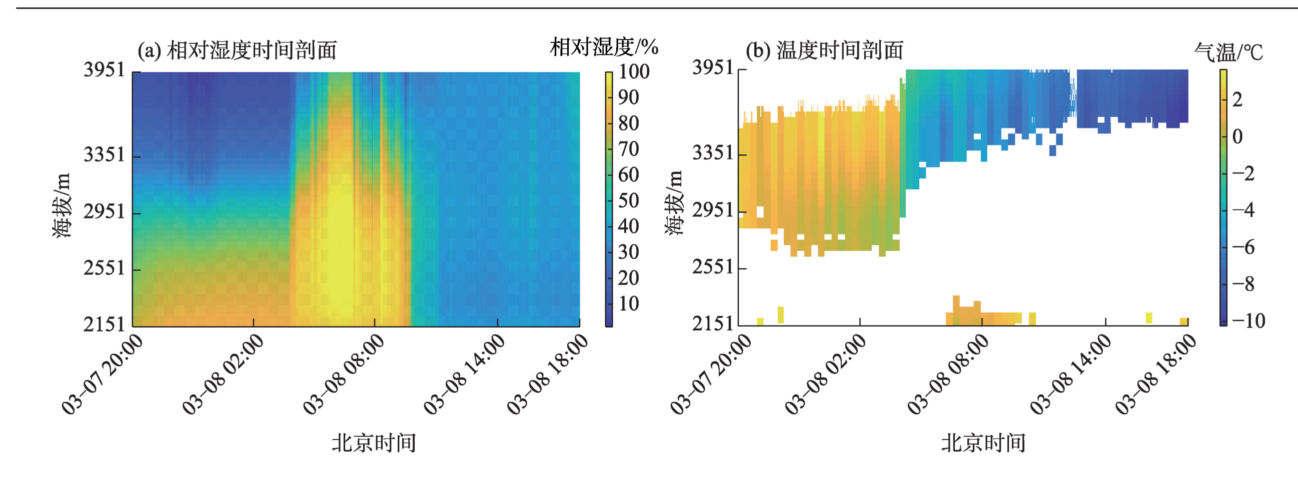


图7 山顶雾过程的温湿时间垂直变化

Fig. 7 Time evolution of temperature and humidity of a mountain top fog process at different heights

面温度随时间先降低、后升高、再降低，而六盘山气象站近地层温度随时间持续降低，7日20:00在2491~3591 m出现逆温，随着能见度的降低逆温往下、往上延伸，最厚逆温层厚度为1130 m，逆温位置正好与相对湿度高值区反相关，当相对湿度开始出现饱和逆温层高度往六盘山气象站上空移动时，逆温层底层移到3111 m，处于六盘山气象站250 m以上，根据雾发生过程气温垂直变化，对3月7日22:00（雾发生前）、8日02:00和8日08:00的温度垂直廓线进行分析，发现在雾发生前和发生过程中在六盘山气象站上空存在不同强度的逆温，在雾发展过程中逆温层和逆温强度最大，其逆温层厚度为560 m，增温强度为2.5 ℃。

4 结 论

（1）六盘山区大范围雾过程主要受系统性云雾降水天气影响，六盘山气象站出现25 h左右雾天，在降水前和降水后隆德、泾源气象站分别出现了辐射雾；仅山顶出现雾时，六盘山气象站的雾发生在夜间并且存在明显的逆温层，属于典型的辐射雾。两类雾在六盘山区出现的时间均较长，且生消迅速，强浓度持续时间长。

（2）两类雾均发生在槽前暖平流、水汽通量大值区域和均压场中，发生雾的地区均出现了降温，相对湿度大于95%，风向以偏南风为主。大范围雾过程中隆德和泾源气象站均出现静稳天气。不管大范围雾过程还是仅山顶雾过程中六盘山气象站最大风速可达到15.8 m·s^{-1}，这可能与六盘山气象站在2845.2 m海拔高度处有关。

（3）随着六盘山气象站雾从浓雾向强浓雾演变，相对湿度从隆德往上延伸，90%以上相对湿度延伸到1040 m，逆温层随着雾向强浓度发展逆温层厚度增厚，且增厚早于强浓雾出现的时间，雾消散逆温层也消散，六盘山气象站发生雾时逆温层厚度最厚为1130 m，而隆德气象站逆温层厚度最厚为190 m，逆温强度100 m六盘山最大增温0.4 ℃，隆德气象站最大增温1.7 ℃。

参考文献（References）

[1] 李子华. 中国近40年来雾的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 616–624. [Li Zihua. Studies of fog in China over the past 40 years [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(5): 616–624.]

[2] Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. Fog research in China: An overview [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(3): 639–661.

[3] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 220–230. [Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, Li Qingxiang, et al. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(2): 220–230.]

[4] Niu S J, Lu C S, Liu Y G, et al. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: A case study[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(6): 1259–1275.

[5] 何立富, 陈涛, 毛卫星. 华北平原一次持续性大雾过程的成因分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(4): 340–350. [He Lifu, Chen Tao, Mao Weixing. The formation of a sustained heavy fog event in North Plain[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22(4): 340–350.]

[6] 郭丽君, 郭学良. 利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究[J]. 气象学报, 2015, 73

(2): 368–381. [Guo Lijun, Guo Xueliang. Verification study of the atmospheric temperature and humidity profiles retrieved from the ground-based multi-channels microwave radiometer for persistent foggy weather events in northern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(2): 368–381.]

[7] 郭丽君, 郭学良. 北京2009—2013年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 296–310. [Guo Lijun, Guo Xueliang. Vertical structure and physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2019—2013 in the Beijing region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(2): 296–310.]

[8] 马禹, 任宜勇, 陈春艳, 等. 40年来新疆雾的演变特征及大雾天气过程分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 474–478. [Ma Yu, Ren Yiyong, Chen Chunyan, et al. Change characteristic of fog and analysis on weather process of heavy fog in Xinjiang in nearly 40 years[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(4): 474–478.]

[9] 李艳春, 李艳芳, 高娜, 等. 银川市雾霾天气的气象条件分析及概念模型建立[J]. 干旱区地理, 2017, 40(6): 1127–1133. [Li Yanchun, Li Yanfang, Gao Na, et al. Meteorological conditions analysis and conceptual model establishment of fog and haze days in Yinchuan City[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(6): 1127–1133.]

[10] 郑玉萍, 李景林. 乌鲁木齐近31年大雾天气气候特征分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 22–28. [Zheng Yuping, Li Jinglin. A study of the climatic characteristics of heavy fog in Urumqi in recent 31 years[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(8): 22–28.]

[11] 陆春松, 牛生杰, 岳平, 等. 南京冬季雾多发期边界层结构观测分析[J]. 大气科学学报, 2011, 34(1): 58–65. [Lu Chunsong, Niu Shengjie, Yue Ping, et al. Observation research on boundary layer structure during high incidence period of winter fog in Nanjing[J]. Transaction of Atmospheric Sciences, 2011, 34(1): 58–65.]

[12] 于华英, 牛生杰, 刘鹏, 等. 2007年12月南京六次雨雾过程宏、微观结构演变特征[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 47–58. [Yu Huaying, Niu Shengjie, Liu Peng, et al. Evolution of the macro-and microphysical properties of precipitation fog in December 2007 in Nanjing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 47–58.]

[13] 吕晶晶, 牛生杰, 张羽, 等. 湛江东海岛一次春季海雾的宏微观结构及边界层演变特征[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 350–365. [Lü Jingjing, Niu Shengjie, Zhang Yu, et al. Evolution characteristics of the macro-/micro-structure and the bundary layer during a spring heavy sea fog episode in Donghai Island in Zhanjiang[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(2): 350–365.]

[14] 吕晶晶, 牛生杰, 赵丽娟, 等. 湛江地区一次冷锋型海雾微物理特征[J]. 大气科学学报, 2014, 37(2): 208–215. [Lü Jingjing, Niu Shengjie, Zhao Lijuan, et al. Microphysical characteristics of a sea fog influenced by a cold front in Zhanjiang[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(2): 208–215.]

[15] Stekl J, Podzimck J. Old mountain meteorological station Milesovka (Donnersberg) in Central Europe[J]. Bulletin of American Meteorological, 1993, 74(5): 831–834.

[16] 郭丽君, 郭学良, 楼小凤, 等. 庐山云雾及降水的日、季节变化和宏微观物理特征观测研究[J]. 气象学报, 2019, 77(5): 923–937. [Guo Lijun, Guo Xueliang, Lou Xiaofeng, et al. An observational study of diurnal and seasonal variations and microphysical properties of clouds and precipitation over Mount Lu, Jiangxi, China[J]. Acta Meteoralogica Sinica, 2019, 77(5): 923–937.]

[17] 费冬冬, 牛生杰, 杨军, 等. 长江中上游冬季山地雾边界层特征及生消过程分析[J]. 大气科学学报, 2016, 39(2): 221–231. [Fei Dongdong, Niu Shengjie, Yang Jun, et al. Boundary layer characteristics and formation processes of winter valley fog in the upper and middle reaches of the Yangtze River[J]. Transaction of Atmospheric Sciences, 2016, 39(2): 221–231.]

[18] 邓雪娇, 吴兑, 唐浩华, 等. 南岭山地一次锋面浓雾过程的边界层结构分析[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 881–889. [Deng Xuejiao, Wu Dui, Tang Haohua, et al. Analyses on boundary layer structure of a frontal heavy fog process in Nanling Mountain area[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(4): 881–889.]

[19] 尤红, 杨明, 郭荣芬, 等. 云南昆洛高速峨山段典型山地雾的诊断分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 87–94. [You Hong, Yang Ming, Guo Rongfen, et al. Diagnostic analysis of typical mountainous fog process in Eshan along Kunming-Daluo high way in Yunnan[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(8): 87–94.]

[20] 张沛, 姚展予, 贾烁, 等. 六盘山地区空中云水资源特征及水凝物降水效率研究[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 421–434. [Zhang Pei, Yao Zhanyu, Jia Shuo, et al. Study of the characteristics of atmospheric water resources and hydrometeor precipitaion efficiency over the Liupan Shan area[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(2): 421–434.]

Preliminary observations study of physical structures of two types of fog in Liupan Mountain areas

DANG Zhangli[1,2], MU Jianhua[1,2], YAN Jun[1], CAO Ning[1,2], CHANG Zhuolin[1,2]

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Ningxia Weather Modification Center, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: Based on the routine observation data of ground visibility, temperature, relative humidity, wind and other meteorological stations in Longde, Jingyuan and Liupan Mountain Meteorological Station obtained from the observation of mountain fog in Liupan Mountain, northwest China in 2020, and the vertical observation data of microwave radiometer temperature and relative humidity, the circulation situation and the vertical evolution characteristics of temperature and humidity in Liupan Mountain were preliminarily analyzed when the fog occurred in a large range and only at the top of the mountain. The results show that both the large-scale fog process and the mountaintop fog process in Liupan Mountain areas are caused by the warm and humid air flow in front of the trough and the cooling and humidification. The relative humidity on the ground during the two types of fog is more than 95%, mainly southerly winds. The visibility of Longde and Jingyuan Meteorological Stations is more than 200 m, and the visibility of Liupan Mountain Meteorological Station is less than 200 m for more than half of the time; The fog at Liupan Mountain is generated and dissipated rapidly, and the strong fog lasts for a long time. The thickness of inversion layer thickens earlier than the time of strong fog, when the fog is mature, the thickness of the inversion layer reaches 1130 m, with the development of fog, the thickness of inversion layer at Longde Meteorological Station has also increased, but it is far less than that at Liupan Mountain Meteorological Station, and the intensity of inversion at Liupan Mountain Meteorological Station is weaker than that at Longde Meteorological Station. With the development of fog, the relative humidity has an obvious upward extension phenomenon, with more than 90% of the relative humidity extending to 1040 m, at the same time, the microwave radiometer of Longde Meteorological Station can observe a saturated area of about 600 m when there is strong fog at Liupan Mountain Meteorological Station, which is of great significance to analyze the vertical evolution of typical mountain fog in Liupan Mountain.

Key words: fog; physical structures; preliminary observations; Liupan Mountain area